塔布河流域潜在蒸散量时空变化特征及成因

王佳爽， 高晓瑜， 李为萍， 池罂男， 张家鹏， 吴怡萱

（内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院，内蒙古 呼和浩特 010018）

摘 要： 潜在蒸散量（ET_0）对流域水文循环具有重要影响，分析ET_0时空变化规律及其与气象要素之间的响应对流域水资源管理具有重要意义。本研究基于塔布河流域及周边7个气象站1981—2023年逐日气象数据，利用Penman-Monteith（P-M）公式估算流域ET_0并分析其时间变化规律和空间分布；采用Beven敏感性公式计算季和年尺度ET_0对关键气象要素的敏感系数，并探究敏感系数的变化趋势；结合气象要素多年相对变化率定量分析影响ET_0变化的主导因子。结果表明：（1）塔布河流域年ET_0以4.09 mm·(10a)$^{-1}$的速率呈不显著增加趋势，多年均值1024.51 mm；空间上，年ET_0自东南向西北逐渐增加。（2）年ET_0对各气象要素敏感系数绝对值大小排序为：相对湿度>最高气温>风速>日照时数>最低气温；春季、秋季和冬季对相对湿度最敏感，夏季对最高气温最敏感。（3）影响年ET_0变化的主要控制因子是最高气温和风速，贡献率分别为4.86%和-4.37%；春、夏、秋、冬四季ET_0变化的主要控制因素分别是最高气温、风速、风速、相对湿度。最高气温的上升和相对湿度的下降是流域ET_0上升的主要原因。

关键词： 潜在蒸散量； P-M公式； 敏感系数； 贡献率； 塔布河流域

潜在蒸散量是假设充分供水状况下的最大实际蒸散发量，是表征区域蒸发能力的重要指标[1]。ET_0受多种气象要素的影响，准确估算ET_0是研究区域水文循环和农业灌溉管理必不可少的理论依据[2]。目前，ET_0的估算方法主要包括温度法、综合法、辐射法、水量平衡法和质量传导法5类[3]，但这些方法在不同地区存在适用性差异。其中，联合国粮农组织推荐的P-M法是较为准确的标准方法[4-5]，通过标准气象数据就可以进行计算，在全球应用广泛，且在中国干旱地区具有很好的适用性[6]。

ET_0在时间和空间上具有差异性，孙福宝[7]指出中国ET_0在时间上表现为1956—1990年以-9.92 mm·(10a)$^{-1}$的速率显著下降，而1990—2005年则以27.27 mm·(10a)$^{-1}$的速率显著上升；空间上，西北干旱区ET_0较大，南方地区ET_0较小。此外，相关研究表明，在过去70 a中国地表平均温度呈现稳定的上升趋势[8]，由此可知1956—1990年中国地区气温升高与ET_0减少同时发生，这种水文现象称为“蒸发悖反”[9]，引发学者广泛讨论。ET_0主要受气象要素和气象变化的影响[10]，探究ET_0对气象要素变化的响应程度，对深入了解区域水热循环和能量变化具有重要意义。因此，很多学者围绕气象要素对ET_0的变化做了大量研究，郭雯雯等[11]发现渭河流域年ET_0对相对湿度最敏感，且相对湿度的减小是年ET_0增加的主要原因，春、夏、秋、冬季节影响ET_0变化的主要气象要素依次为相对湿度、日照时数、相对湿度、风速；毕彦杰等[12]在研究京津冀地区ET_0敏感性分析时发现该区域ET_0对相对湿度最敏感，但对ET_0变化贡献率最大的是风速；付昌昌等[13]发现盐湖流域ET_0变化对相对湿度敏感系数最大，且相对湿度对ET_0的贡献率也最大。李晨等[14]认为宁夏引黄灌区和中部干旱带对最高气温最敏感，但影响引黄灌区和中部干旱带ET_0变化主要气象要素分别为平均风速、相对湿度；由此可见，不同研究区域和不同时间尺度ET_0对气象要素的敏感系数不同，敏感系数与贡献率也并非完全一致[15]。

塔布河流域位于北方农牧交错带，是沿线重要的供水水源。流域气候干燥、降雨稀少、气象条件

收稿日期： 2024-06-04； **修订日期：** 2024-08-09
基金项目： 内蒙古自然科学基金（2022MS05047）；中国水利水电科学研究院内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站开放研究基金（YSS2022007）
作者简介： 王佳爽（1998-），女，硕士研究生，主要从事干旱区水文过程研究. E-mail: 18382000570@163.com
通讯作者： 高晓瑜. E-mail: gxy@imau.edu.cn

复杂多变、生态环境脆弱，蒸散发是水量的主要消耗途径。目前，关于塔布河流域不同时间尺度ET_0变化及相关气象要素对ET_0变化的影响研究较少。因此，为保证流域水资源持续利用和荒漠化防治，深入分析流域ET_0对主要气象要素变化的响应十分必要。本文采用P-M公式估算塔布河流域ET_0，分析流域ET_0时空变化特征，对影响ET_0变化的5个关键气象要素进行敏感性分析，最后探讨季尺度和年尺度影响流域ET_0变化的主导因子，从气象要素的角度分析影响塔布河流域ET_0变化的原因，为区域水资源管理和生态环境修复等提供科学依据。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

塔布河流域位于内蒙古自治区中部，是四子王旗境内最大的河流，地处110°30′~112°11′E、41°21′~42°46′N，总面积为1.02×10^4 km²，海拔在900~2200 m，地形南高北低，山地与丘陵相间分布（图1）。属于温带半干旱大陆性气候，年平均气温介于2.20~5.50 ℃，昼夜温差较大，年平均风速为1.92~3.16 m·s^{-1}，多年平均降水量为315.60 mm，其中，6—9月降水量达年降水量的70%左右，流域多年平均水面蒸发量在2000 mm左右，是水资源缺乏地区。根据2023年的土地利用类型数据统计，流域北部主要为荒漠草原，中部及南部下垫面以耕地和草地为主，分别约占38%、58%。

1.2　数据来源

本文选取塔布河流域及其周边7个气象站点1981—2023年的逐日气象数据，包括最高气温（℃）、平均气温（℃）、最低气温（℃）、相对湿度（%）、日照时数（h）、2 m处风速（m·s^{-1}），数据来源于中国气象科学数据共享服务平台。由于极端气象条件、设备损坏等原因导致个别日期数据缺失，但缺失量不足总数据量的3%，因此采用线性回归法对个别缺失的日气象数据进行插补来保证数据的质量。DEM高程数据来自地理空间数据云平台（http://www.gscloud.cn/）提供的30 m分辨率数据集。

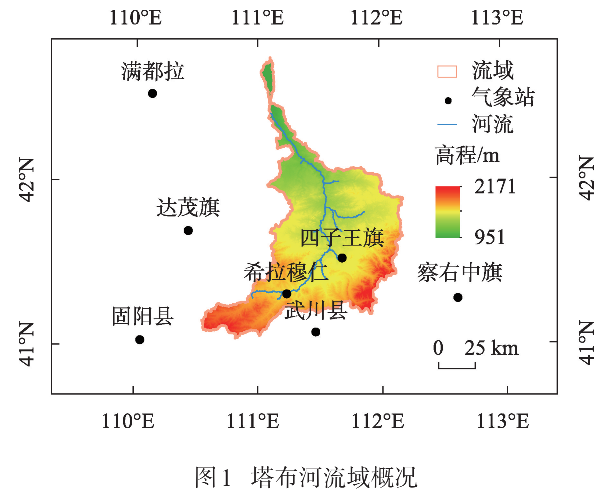


图1　塔布河流域概况

Fig. 1　Overview of the Tabu River Basin

1.3　研究方法

1.3.1　P-M模型计算潜在蒸散量　P-M模型充分考虑了各气象要素的综合影响，理论基础明确、误差小，是目前国际上广泛应用且认可度高的模型，其计算公式为：

$$ET_0=\frac{0.408\Delta\left[R_n-G\right]+\gamma\frac{900}{T+273}U_2\left(e_s-e_a\right)}{\Delta+\gamma\left(1+0.34U_2\right)}\tag{1}$$

式中：Δ为水汽压曲线斜率（kPa·℃$^{-1}$）；R_n为作物表面净辐射（MJ·m^{-2}·d^{-1}），由于缺少观测值，通过净短波辐射和净长波辐射之差得到；G为土壤热通量（MJ·m^{-2}·d^{-1}），在日尺度上数量级相当小，几乎为0；γ为温度计常数（kPa·℃$^{-1}$）；T为空气平均温度（℃）；U_2为2 m处风速（m·s^{-1}）；e_s为饱和水汽压（kPa）；e_a为实际水汽压（kPa）。具体计算过程参考FAO指导书[16]。

1.3.2　Pettitt突变分析　Pettitt突变分析方法计算简便，近年来被广泛应用于长时间序列水文气象要素的突变分析，判断突变点位置及获得突变点数量[17]。定义统计量序列$U_{t,n}$：

$$U_{t,n}=U_{t-1,n}+\sum_{k=1}^{n}\mathrm{sgn}\left(x_t-x_k\right)\tag{2}$$

式中：x_t、x_k分别为假设检验的第t、k个随机变量；n代表数据序列的长度；sgn(x_t-x_k)为表征函数。若t时刻满足：$K_{t,n}=\max|U_{t,n}|$（$1\le t\le n$），则t点为突变点。计算统计量$P=2\exp[-6K_{t,n}^2/(n^3+n^2)]$，若$P\le0.05$，则认为检测出的突变点为显著突变点。

1.3.3　Mann-Kendall趋势检验　Mann-Kendall（M-K）趋势检验法是世界气象组织（WMO）推荐且广泛使用的一种非参数统计检验方法[18]。在检验中，假设时间序列的数据（X_1，X_2，…，X_n）相互独立，定义检验统计量S的计算公式如下：

$$S=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=k+1}^{n}\mathrm{sgn}\left(X_t-X_k\right)\tag{3}$$

式中：X_t、X_k分别为时间序列中第t、k个数值。S为正态分布，均值为0，当自由度大于10时，通过公式计算方差var(S)，进而计算出统计量Z值。采用双边趋势检验ET_0及气象要素的时间序列变化趋势的显著性，Z>0和Z<0分别表示增加和减少趋势，$|Z|$>2.58表示通过了置信度99%的显著性检验，认为变化趋势具有显著性；$|Z|$>3.03表示通过了置信度99.9%的显著性检验，认为变化趋势具有极显著性。

1.3.4 敏感系数与贡献率 敏感系数是衡量气象要素(x)对ET_0影响的重要指标。通常采用Beven[19]提出的敏感系数公式计算气象要素对ET_0的影响程度。

$$S_x=\lim_{\Delta x\to 0}\left(\frac{\Delta ET_0}{ET_0}\Big/\frac{\Delta x}{x}\right)=\frac{\partial ET_0}{\partial x}\frac{|x|}{ET_0}\approx\frac{\Delta ET_0}{\Delta x}\frac{|x|}{ET_0} \quad (4)$$

式中：S_x为敏感系数，无量纲；Δx为气象要素x的变化；ΔET_0为气象要素x的变化引起的ET_0的变化；本文使用一阶泰勒级数近似求解S_x。S_x的正(负)表示ET_0随气象要素x的增加而增加(减少)，$|S_x|$越大，表示ET_0对气象要素x的敏感程度越高。

贡献率采用Yin等[20]提出的气象要素多年相对变化率与敏感系数的乘积表示。

$$R_x=C_x\times S_x \quad (5)$$

$$C_x=\frac{n\times a_x}{\bar{x}} \quad (6)$$

式中：R_x为气象要素x的贡献率；C_x为气象要素x多年相对变化率；a_x为气象要素x的倾向率；n为时间序列长度，取n=43；$\bar{x}$为气象要素x的多年平均值。

2 结果与分析

2.1 塔布河流域潜在蒸散量变化特征

2.1.1 时间变化 1981—2023年塔布河流域年均ET_0为1024.51 mm，变化范围为914.92~1121.34 mm。如图2所示，流域年ET_0呈上升趋势，线性倾向率为4.09 mm·(10a)$^{-1}$，由M-K检验结果可知(表1)，年ET_0变化不显著。采用Pettitt突变检验对该流域ET_0进行突变检验，结果如图3所示，1997年流域ET_0发生了突变，1981—1996年以-25.96 mm·(10a)$^{-1}$的速率呈减小趋势，1997—2023年则以1.50 mm·(10a)$^{-1}$的速率呈增加趋势，均未通过M-K显著性检验。

塔布河流域不同季节ET_0的时间变化如图4所示，多年来流域四季ET_0变化趋势存在显著差异，春季(3—5月)、夏季(6—8月)、冬季(12—2月)呈缓慢上升趋势，倾向率分别为4.17 mm·(10a)$^{-1}$、1.56 mm·

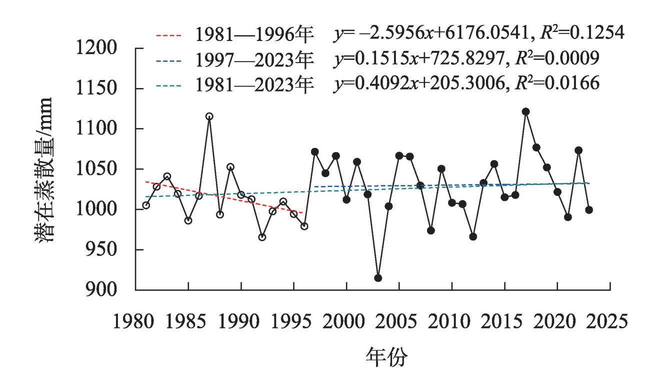


图2 塔布河流域突变前后ET_0变化趋势

Fig. 2 Variation trend of ET_0 before and after the mutation in the Tabu River Basin

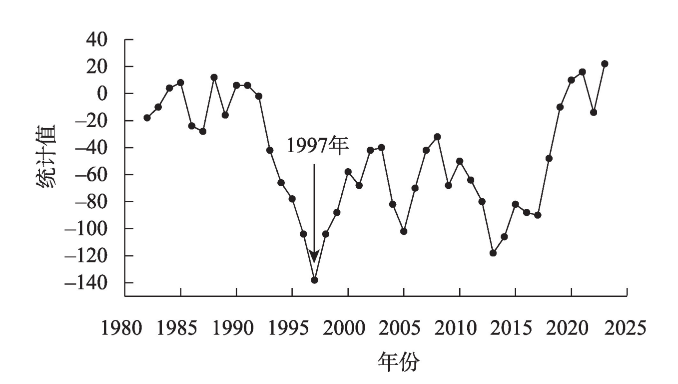


图3 塔布河流域ET_0序列Pettitt突变检验

Fig. 3 Pettitt mutation test of ET_0 in sequence in the Tabu River Basin

表1 塔布河流域年和季ET_0变化趋势

Tab. 1 Variation trend of annual and seasonal ET_0 in the Tabu River Basin

时段	春季		夏季		秋季		冬季		年	
	ET_0均值/mm	Z值	ET_0均值/mm	Z值	ET_0均值/mm	Z值	ET_0均值/mm	Z值	ET_0均值/mm	Z值
1981—1996年	320.93	−1.17	446.10	−1.98	190.18	−0.27	57.58	2.70	1014.79	−1.89
1997—2023年	328.42	1.98	453.45	−0.23	190.50	−1.15	60.13	−0.06	1030.27	0.15
1981—2023年	325.63	1.56	450.71	0.16	190.38	−0.76	59.18	1.43	1024.51	0.83

注：$|Z|$>2.58表示通过了置信度99%的M-K显著性检验。

(10a)$^{-1}$、1.46 mm·(10a)$^{-1}$,秋季(9—11月)呈下降趋势,倾向率为−1.27 mm·(10a)$^{-1}$,均未通过M-K显著性检验(表1)。各季节对年ET_0的贡献率排序为:夏季(43.91%)>春季(31.74%)>秋季(18.56%)>冬季(5.79%)。

2.1.2　空间变化　使用ArcGIS软件里的反距离空间插值工具对流域近43 a的ET_0进行可视化处理,得到图5。根据图5a可知,流域ET_0空间分布表现出东

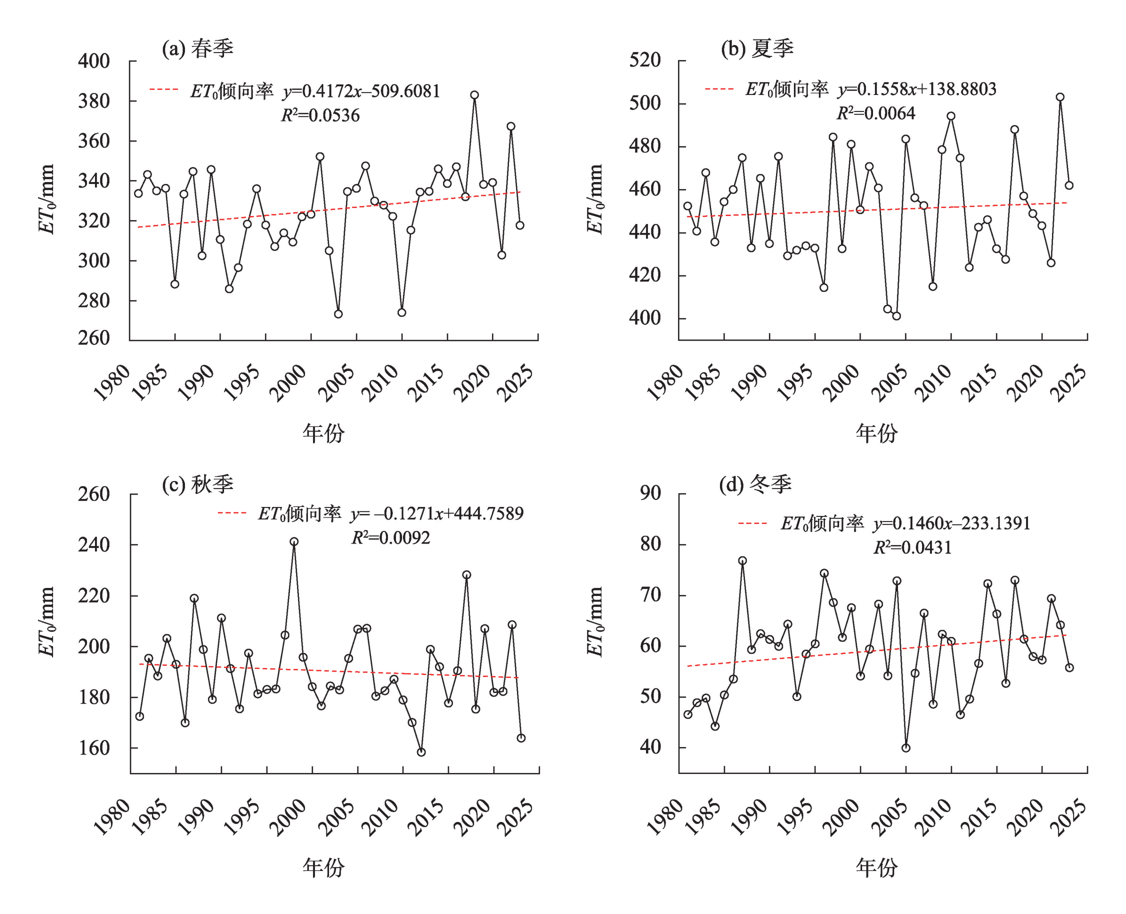


图4　1981—2023年塔布河流域ET_0季节变化趋势

Fig. 4　Seasonal variation trend of ET_0 in the Tabu River Basin from 1981 to 2023

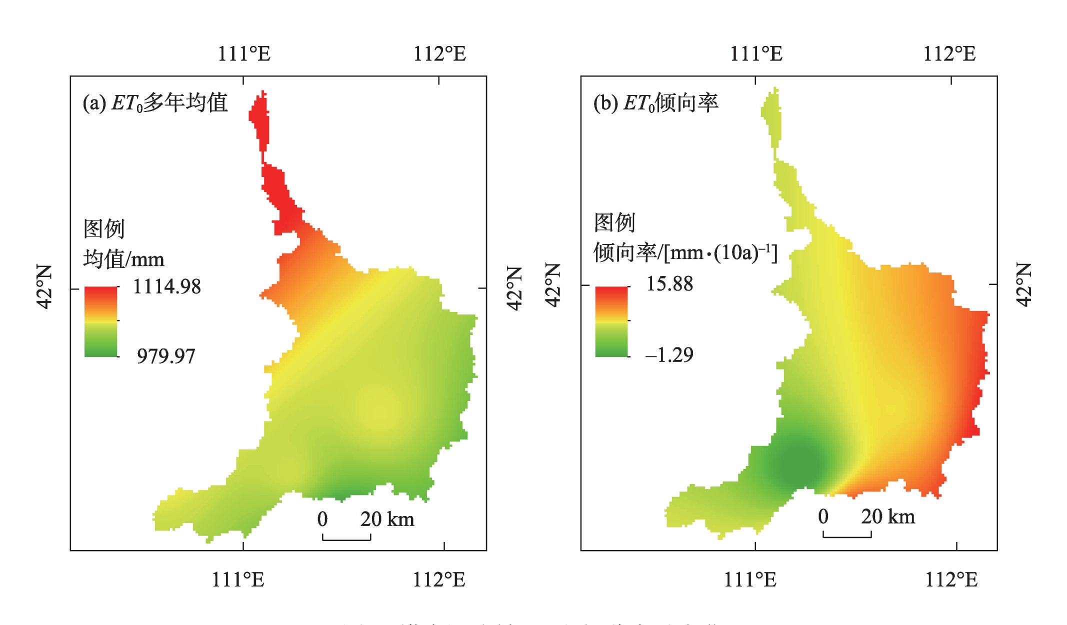


图5　塔布河流域ET_0空间分布及变化

Fig. 5　Spatial distribution and variation of ET_0 in the Tabu River Basin

南向西北逐渐增加趋势，流域北部土地利用类型以荒漠草原为主，气候干燥，蒸发能力大，而流域中部和南部土地利用类型以草地和耕地为主，植被覆盖率相对较高，因此，南部ET_0相对北部ET_0低。此外，流域43 a的ET_0在空间变化趋势上也有差异，东部ET_0增加速率较快，西南部部分地区ET_0呈现微弱的减小趋势(图5b)。

2.2 潜在蒸散量对关键气象要素敏感性变化

敏感系数是评估气象要素变化对ET_0影响的重要指标，敏感系数的正负和大小有助于我们理解气象要素与ET_0之间的关系。表2给出了塔布河流域ET_0对5个气象要素的敏感系数及敏感系数倾向率。从年际看，最高气温、最低气温、日照时数、风速均与ET_0为正向关系，而相对湿度与ET_0为负向关系，年ET_0对各气象要素的敏感程度排序：相对湿度(−0.63)>最高气温(0.33)>风速(0.24)>日照时数(0.16)>最低气温(0.04)；从季节看，春季ET_0对相对湿度最敏感，为−0.37，最高气温次之，为0.34；夏季ET_0对最高气温和相对湿度较敏感，敏感系数依次为0.44、−0.40；秋季和冬季ET_0对相对湿度的敏感系数最高，分别为−0.73、−1.04，对其余气象要素的敏感系数相对较小。

图6为塔布河流域影响ET_0变化的5个关键气象要素敏感系数的空间分布，可以看出，ET_0对不同气象要素敏感系数的空间分布特征不同。ET_0对最高气温的敏感程度呈自东南向西北逐渐增大的趋势，变化范围为0.31~0.38；最低气温敏感系数空间表现为以四子王旗为低值中心，向外逐渐增大，变化范围介于0.01~0.12之间；相对湿度敏感系数的空间变化范围较大，在−0.77~−0.59之间，高敏感区位于流域南部的希拉穆仁附近，低敏感区位于流域中部的四子王旗附近；日照时数敏感系数在空间上表现为随纬度的增大而减小，变化范围为0.14~0.16；ET_0对风速敏感系数的空间分布特征与流域的地形特征密切相关，流域南部海拔较高，山地与丘陵相间分布，北部地形较平坦，这导致流域南部风速相对变化幅度较北部小，对流域ET_0变化的响应程度也较小。

2.3 气象要素贡献率分析

气象要素对塔布河流域季和年ET_0变化的贡献率见表3，总体来看，最高气温、最低气温和相对湿度对年ET_0的升高具有促进作用，日照时数和风速则对ET_0的升高具有抑制作用。气象要素对流域年ET_0变化的贡献率表现为：最高气温>风速>相对湿度>最低气温>日照时数，即最高气温和风速为流域年ET_0变化的主要控制因子。季节上，最高气温对春季ET_0变化贡献率最大，为6.38%；夏季和秋季对ET_0变化贡献率最大的气象要素均为风速，分别为−3.24%、−5.08%；相对湿度是冬季ET_0变化的主导因子，贡献率达8.48%。

各站点气象要素对ET_0变化的贡献率见表4，可知同一气象要素在不同站点对ET_0变化的贡献有明显差异，由于部分站点最低气温多年均值很小，接近0，由公式(6)计算得到的多年相对变化率较大，这导致最低气温贡献率精确度不足，因此，在讨论各站点ET_0变化的控制因素时，暂不考虑最低气温的影响。四子王旗和希拉穆仁是塔布河流域ET_0变化的主要控制站点，主导因子分别是最高气温和风速，这与整个流域ET_0变化的主要控制因素一致。

表2 塔布河流域ET_0对气象要素敏感系数及其变化特征

Tab. 2 Sensitivity coefficient and variation characteristics of ET_0 to meteorological elements in the Tabu River Basin

季节	评价指标	气象要素				
		最高气温	最低气温	相对湿度	日照时数	风速
春季	敏感系数均值	0.34	0.03	−0.37	0.21	0.21
	倾向率	0.01	0	0.02	0	0.01*
夏季	敏感系数均值	0.44	0.03	−0.40	0.30	0.16
	倾向率	0	0.05	0.02	0	0.01*
秋季	敏感系数均值	0.32	0.03	−0.73	0.29	0.13
	倾向率	0	−0.01	0.01	0	0.01*
冬季	敏感系数均值	0.23	0.08	−1.04	0.02	0.32
	倾向率	0.01	−0.11	0.05**	0	0.01*
年	敏感系数均值	0.33	0.04	−0.63	0.16	0.24
	倾向率	0.01	−0.02	0.03*	0	0.01*

注：*、**分别表示通过了0.01、0.001的M-K显著性检验；敏感系数倾向率单位为每10 a。

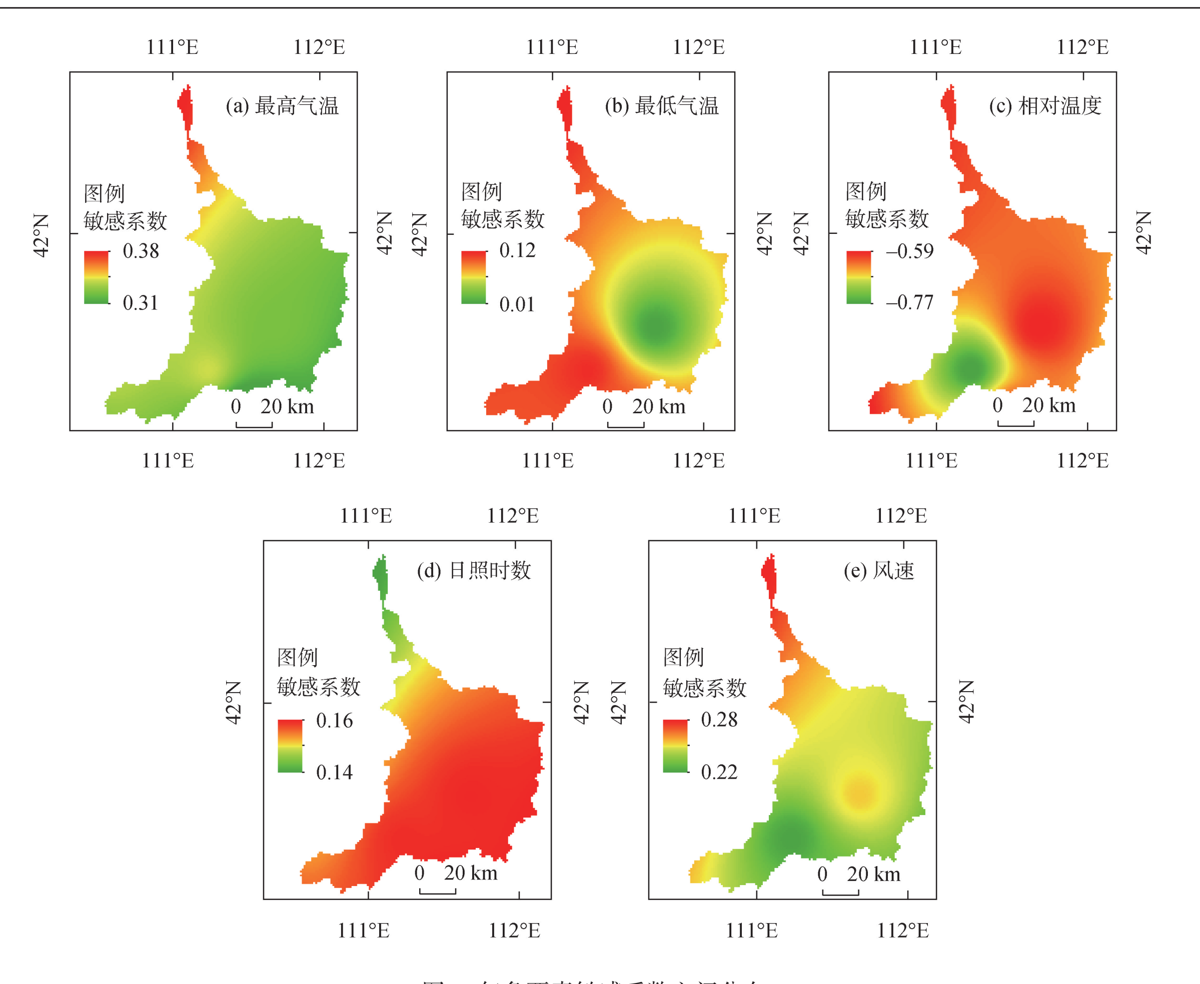


图6　气象要素敏感系数空间分布

Fig. 6　Spatial distribution of sensitivity coefficients of meteorological factors

表3　塔布河流域气象要素对季和年ET_0变化的贡献率

Tab. 3　Contribution rate of meteorological elements to seasonal and annual ET_0 changes in the Tabu River Basin /%

气象要素	春季		夏季		秋季		冬季		年	
	多年相对变化率	贡献率	多年相对变化率	贡献率	多年相对变化率	贡献率	多年相对变化率	贡献率	多年相对变化率	贡献率
最高气温	18.75	6.38	6.74	2.97	13.52	4.33	18.50	4.26	14.74	4.86
最低气温	132.97	3.99	10.71	0.32	86.30	2.59	−1.10	−0.09	52.43	2.10
相对湿度	−10.91	4.04	−4.46	1.78	1.24	−0.91	−8.15	8.48	−5.16	3.25
日照时数	−3.78	−0.79	−5.22	−1.57	−6.70	−0.87	−1.28	−0.03	−4.17	−0.67
风速	−16.93	−3.55	−20.26	−3.24	−17.50	−5.08	−16.18	−5.18	−18.22	−4.37

3　讨 论

基于Pettitt突变检验发现塔布河流域ET_0在1997年发生了突变，1981—1996年ET_0呈减小趋势，1997—2023年ET_0呈增加趋势，这与Yin等[20]的研究结果一致，即中国ET_0在20世纪90年代左右发生突变，变化趋势由下降转为上升。研究表明，气象要素的变化是影响ET_0变化的主要原因，且ET_0对气象要素的响应程度存在区域差异[21]。邹海平等[22]研究发现气温的升高是海南岛ET_0增加的关键因素；刘玉汐等[23]指出风速是导致吉林省ET_0变化的首要因素，闫妍等[24]对西江流域进行研究发现相对湿度是ET_0变化的主导因子。本研究通过对5个气象要素的定量改变来分析其对ET_0变化的影响，并使用敏感系数来评价气象要素对ET_0变化的响应程度，根据敏感性计算结果可知，仅相对湿度与ET_0为负向关系，其余气象要素与ET_0均为正向关系，根据图7气

表4 塔布河流域各站点气象要素对ET_0变化的贡献率

Tab. 4 Contribution rate of meteorological factors to the change of ET_0 at each station in the Tabu River Basin /%

	最高气温		最低气温		相对湿度		日照时数		风速	
	多年相对变化率	贡献率	多年相对变化率	贡献率	多年相对变化率	贡献率	多年相对变化率	贡献率	多年相对变化率	贡献率
四子王旗	15.14	4.95	48.59	0.66	−5.04	3.28	−4.59	−0.75	−12.76	−3.23
希拉穆仁	14.81	5.04	46.87	5.57	−3.56	2.73	−2.70	−0.44	−28.24	−6.28
达茂旗	14.18	5.25	172.69	21.76	−10.41	5.76	−4.13	−0.57	−30.18	−8.79
固阳县	8.69	2.77	156.18	16.20	−3.72	1.85	−12.26	−2.03	10.61	2.79
武川县	11.34	3.34	144.21	15.72	−10.83	6.49	−0.98	−0.16	−9.31	−2.14
满都拉	11.16	4.90	194.5	31.91	−11.89	6.81	−12.91	−1.51	−20.66	−6.51
察右中旗	19.10	5.63	58.33	7.59	−9.88	7.55	5.27	0.90	16.39	3.23

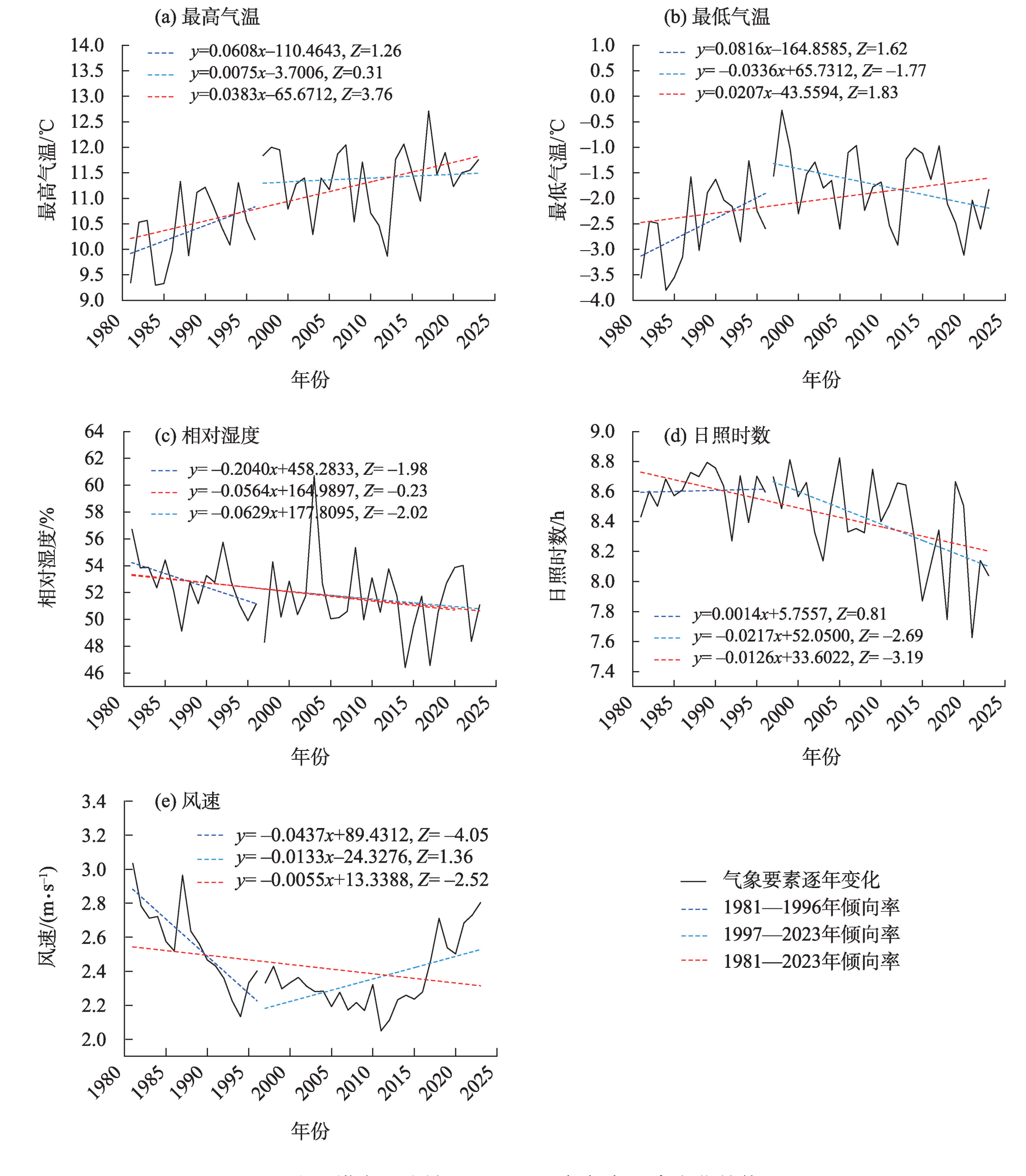


图7 塔布河流域1981—2023年气象要素变化趋势

Fig. 7 Variation trends of meteorological factors in the Tabu River Basin from 1981 to 2023

象要素变化趋势及其显著性检验可知,研究期内风速的下降和日照时数的显著下降均会导致ET_0下降,而最高温度的极显著上升和相对湿度的下降则会导致ET_0上升,由表3可知,年尺度各气象要素对ET_0的正贡献率大于负贡献率,导致塔布河流域1981—2023年ET_0呈上升趋势,因此塔布河流域ET_0上升的主要原因是最高气温的上升和相对湿度的下降,这与石欣荣等[25]对三北地区ET_0的变化成因结果一致。流域ET_0多年相对变化率为1.72%,气象要素引起的ET_0多年相对变化为3.07%,误差为-1.35%。

由前文敏感性和贡献率结果可知,年ET_0对气象要素的敏感性由大到小依次为相对湿度、最高气温、风速、日照时数、最低气温,而贡献率由高到低依次为最高气温、风速、相对湿度、最低气温、日照时数,影响流域ET_0变化的敏感因子与主导因子排序并不一致,这是因为ET_0变化不仅受气象要素敏感系数的影响,还与各气象要素的相对变化率有关[26]。钱多等[27]研究发现毛乌素沙地ET_0对风速的敏感性最大,但气温的多年相对变化率较风速大,导致气温为影响该地区ET_0变化的主导因子;胡琦等[28]研究发现中国地区ET_0对相对湿度的变化最敏感,但由于风速的显著下降导致风速成为引起ET_0变化的关键因子。由表4可知,气象要素多年相对变化率(绝对值)为:风速(-18.22%)>最高气温(14.74%)>相对湿度(-5.16%)>日照时数(-4.17%),虽然相对湿度的敏感系数最大,但变化幅度较小,而最高气温和风速的敏感系数较大,且多年相对变化幅度也较大,所以,最高气温和风速对ET_0变化的贡献率比相对湿度大;日照时数敏感系数较小,且多年相对变化率也最小,因此日照时数对ET_0变化的贡献率最小。

4 结 论

基于1981—2023年塔布河流域及周边7个气象站日气象数据,采用P-M模型估算流域ET_0,分析流域ET_0时空变化特征,采用Beven提出的敏感性公式计算ET_0对5个关键气象要素的敏感程度,并对ET_0变化进行归因分析,主要得出结论如下:

(1) 塔布河流域近43 a的ET_0以4.09 mm·(10a)$^{-1}$的速率呈不显著上升趋势,多年均值1024.51 mm,1997年流域ET_0发生突变。季节上,春季、夏季、冬季呈增加趋势,秋季呈下降趋势。空间上,ET_0由东南向西北逐渐增加,变化范围为979.97~1114.98 mm。

(2) 年ET_0对各气象要素敏感系数(绝对值)大小排序为:相对湿度>最高气温>风速>日照时数>最低气温。季节上,春季、秋季和冬季对相对湿度最敏感,敏感系数分别为-0.37、-0.73、-1.04,夏季对最高气温最敏感,为0.44。

(3) 最高气温、最低气温、相对湿度、日照时数和风速对流域年ET_0变化的贡献率依次为:4.86%、2.10%、3.25%、-0.67%和-4.37%,故流域年ET_0变化的主要控制因子是最高气温和风速。季节上,最高气温对春季ET_0变化贡献最大,夏季和秋季ET_0变化的主导因子是风速,冬季ET_0变化主导因子是相对湿度。

参考文献(References):

[1] Gong L, Xu C, Chen D, et al. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(3-4): 620-629.

[2] 曹永强, 刘明阳, 李元菲, 等. 不同潜在蒸散发估算方法在辽宁省的适用性分析[J]. 资源科学, 2019, 41(10): 1780-1790. [Cao Yongqiang, Liu Mingyang, Li Yuanfei, et al. Applicability of six potential evapotranspiration estimation methods in Liaoning Province[J]. Resources Science, 2019, 41(10): 1780-1790.]

[3] 鞠琴, 高慧滨, 王国庆, 等. 基于能量平衡原理的潜在蒸散发模型构建[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 794-804. [Ju Qin, Gao Huibin, Wang Guoqing, et al. Modeling potential evapotranspiration based on energy balance[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(5): 794-804.]

[4] 刘佩贵, 夏艳, 尚熳廷. 不同质地裸土潜水蒸发估算方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 148-153. [Liu Peigui, Xia Yan, Shang Manting. Estimation methods of phreatic evaporation for different textures in bare soil area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(1): 148-153.]

[5] 陈少丹, 张利平, 田祥勇, 等. 基于P-M模型和MOD16数据的长江中下游潜在蒸散量比较分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(4): 283-289, 296. [Chen Shaodan, Zhang Liping, Tian Xiangyong, et al. Comparative analysis of potential evapotranspiration estimation between Penman-Monteith model and MOD16 data in Middle and Lower Yangtze River Basin[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2019, 52(4): 283-289, 296.]

[6] 伍海, 夏军, 赵玲玲, 等. 变化环境下12种潜在蒸散发估算方法在不同干湿区的适用性[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(1): 1-11. [Wu Hai, Xia Jun, Zhao Lingling, et al. Application of 12 potential evapotranspiration estimation methods un-

der changing environments in different arid and humid regions[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 1-11.]

[7] 孙福宝. 基于Budyko水热耦合平衡假设的流域蒸散发研究[D]. 北京: 清华大学, 2007. [Sun Fubao. Study on Watershed Evapotranspiration Based on the Budyko Hypothesis[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.]

[8] 丛振涛, 倪广恒, 杨大文, 等. "蒸发悖论"在中国的规律分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 147-152. [Cong Zhentao, Ni Guangheng, Yang Dawen, et al. Evaporation paradox in China[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 147-152.]

[9] Michael L R, Graham D F. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. Science, 2002, 298(15): 1410-1411.

[10] 杨林山, 李常斌, 王帅兵, 等. 洮河流域潜在蒸散发的气象敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 102-109. [Yang Linshan, Li Changbin, Wang Shuaibing, et al. Sensitive analysis of potential evapotranspiration to key climatic factors in Taohe River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(11): 102-109.]

[11] 郭雯雯, 黄生志, 赵静, 等. 渭河流域潜在蒸散发时空演变与驱动力量化分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 81-89. [Guo Wenwen, Huang Shengzhi, Zhao Jing, et al. Spatio-temporal dynamics and driving forces of potential evapotranspiration in the Wei River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(3): 81-89.]

[12] 毕彦杰, 赵晶, 赵勇, 等. 京津冀地区潜在蒸散量时空演变特征及归因分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 130-140. [Bi Yanjie, Zhao Jing, Zhao Yong, et al. Spatial-temporal variation characteristics and attribution analysis of potential evapotranspiration in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(5): 130-140.]

[13] 付昌昌, 刘聪, 李向全. 可可西里盐湖流域潜在蒸散发演变规律及成因分析[J]. 水文, 2022, 42(6): 25-30. [Fu Changchang, Liu Cong, Li Xiangquan. Research on evolution and causes for the potential evapotranspiration of the Yanhu Lake Basin in Hoh Xil region[J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(6): 25-30.]

[14] 李晨, 李王成, 董亚萍, 等. 宁夏地区潜在蒸散发变化特征及成因分析[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(2): 186-192. [Li Chen, Li Wangcheng, Dong Yaping, et al. Characteristics and causes of potential evapotranspiration in Ningxia region[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(2): 186-192.]

[15] 谢平, 龙怀玉, 张杨珠, 等. 云南省四季潜在蒸散量时空演变的主导气象因子分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 184-193. [Xie Ping, Long Huaiyu, Zhang Yangzhu, et al. Dominant meteorological factors of spatiotemporal variations of seasonal potential evapotranspiration in Yunnan Province during the period from 1981 to 2011[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(2): 184-193.]

[16] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 [M]. Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

[17] 胡广录, 陶虎, 焦娇, 等. 黑河中游正义峡径流变化趋势及归因分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(9): 1414-1424. [Hu Guanglu, Tao Hu, Jiao Jiao, et al. Runoff trend and attribution analysis of the Zhengyi Gorge in the middle reaches of the Heihe River[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(9): 1414-1424.]

[18] 季宗虎, 孙栋元, 牛最荣, 等. 疏勒河流域降水变化特征研究[J]. 干旱区研究, 2023, 40(10): 1583-1594. [Ji Zonghu, Sun Dongyuan, Niu Zuirong, et al. Characteristics of precipitation changes in the Shule River Basin[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(10): 1583-1594.]

[19] Beven K. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates[J]. Journal of Hydrology, 1979, 44(3): 169-190.

[20] Yin Y H, Wu S H, Dai E F. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971-2008[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55: 3329-3337.

[21] Sharifi A, Dinpashoh Y. Sensitivity analysis of the Penman-Monteith reference crop evapotranspiration to climatic variables in Iran [J]. Water Resources Management, 2014, 28(15): 5465-5476.

[22] 邹海平, 陈汇林, 田光辉, 等. 海南岛参考作物蒸散量时空变化特征及成因分析[J]. 中国农业气象, 2018, 39(1): 18-26. [Zou Haiping, Chen Huilin, Tian Guanghui, et al. Spatiotemporal change characteristics and causes analysis of reference crop evapotranspiration in Hainan Island[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(1): 18-26.]

[23] 刘玉汐, 任景全, 王冬妮, 等. 吉林省参考作物蒸散量时空分布及成因分析[J]. 生态环境学报, 2019, 28(11): 2208-2215. [Liu Yuxi, Ren Jingquan, Wang Dongni, et al. Spatio-temporal distribution characteristics and causes analysis of reference crop evapotranspiration in Jilin Province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(11): 2208-2215.]

[24] 闫妍, 黄凯燕, 胡宝清, 等. 1965—2018年广西西江流域参考作物蒸散量时空演变及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2020, 39(5): 1676-1684. [Yan Yan, Huang Kaiyan, Hu Baoqing, et al. Spatial and temporal variations of reference evapotranspiration and its influencing factors in Guangxi Xijiang River Basin from 1965 to 2018[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(5): 1676-1684.]

[25] 石欣荣, 佘敦先, 夏军, 等. 1960—2019年三北地区潜在蒸散发的变化及归因[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(10): 973-984. [Shi Xinrong, She Dunxian, Xia Jun, et al. Variation and attribution of potential evapotranspiration in the Three-Northern Regions, China during 1960-2019[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2022, 55(10): 973-984.]

[26] 刘小莽, 郑红星, 刘昌明, 等. 海河流域潜在蒸散发的气象敏感性分析[J]. 资源科学, 2009, 31(9): 1470-1476. [Liu Xiaomang,

Zheng Hongxing, Liu Changming, et al. Sensitivity of the potential evapotranspiration to key climatic variables in the Haihe River Basin[J]. Resources Science, 2009, 31(9): 1470-1476.]

[27] 钱多, 查天山, 吴斌, 等. 毛乌素沙地参考作物蒸散量变化特征与成因分析[J]. 生态学报, 2017, 37(6): 1966-1974. [Qian Duo, Zha Tianshan, Wu Bin, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of reference crop evapotranspirationin the Mu Us Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(6): 1966-1974.]

[28] 胡琦, 董蓓, 潘学标, 等. 1961—2014年中国干湿气候时空变化特征及成因分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 124-132. [Hu Qi, Dong Bei, Pan Xuebiao, et al. Spatiotemporal variation and causes analysis of dry-wet climate over period of 1961-2014 in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(6): 124-132.]

Spatial-temporal variation characteristics and attribution analysis of potential evapotranspiration in the Tabu River Basin

WANG Jiashuang, GAO Xiaoyu, LI Weiping, CHI Zhaonan,
ZHANG Jiapeng, WU Yixuan

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China)

Abstract: Potential evapotranspiration (ET_0) has an important impact on the hydrological cycle of the Tabu River Basin. Temporal and spatial variations in ET_0 values in response to meteorological factors can inform water resource management in basins. For this study, daily meteorological data were collected from 7 meteorological stations in the Tabu River Basin and surrounding areas from 1981 to 2023. The Penman-Monteith (P-M) formula was used to estimate the ET_0 to analyze temporal and spatial distribution patterns. The Beven sensitivity formula was used to calculate the sensitivity coefficient of seasonal and annual changes in ET_0 to key meteorological factors and to explore trends in the sensitivity coefficient. Quantitative analysis was performed to determine the dominant factors affecting ET_0 changes based on the relative changes in meteorological factors over time. The annual ET_0 in the Tabu River Basin increased by 4.09 mm·$(10a)^{-1}$, with a multiyear average of 1024.51 mm. Spatially, the annual ET_0 was lowest in the southeast and highest in the northwest. The absolute values of the sensitivity coefficient of annual ET_0 to various meteorological factors in decreasing order are relative humidity>maximum temperature>wind speed>sunshine hours>minimum temperature. The coefficients for relative humidity were highest for spring, autumn, and winter, while temperature had the highest coefficient for summer. The main factors affecting the change in annual ET_0 were maximum temperature and wind speed, with contributions of 4.86% and −4.37%, respectively. On a seasonal scale, the main factors affecting ET_0 changes in spring, summer, autumn, and winter were maximum temperature, wind speed, and relative humidity. An increase in maximum temperature and a decrease in relative humidity in the basin are the main reasons for the rise in ET_0.

Keywords: potential evapotranspiration; P-M equation; sensitivity coefficient; contribution rate; Tabu River Basin